

ОСОБЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ ХАОТИЧНОГО СИГНАЛУ

DOI 10.36994 / 2788-5518-2022-01-03-02

Кушнір М.Я., к. ф.-м. н., доц, Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці, Україна. myk.kushnir@chnu.edu.ua

Галюк С.Д., к.т.н. Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці, Україна. s.haliuk@chnu.edu.ua

Семенко А.І., д.т.н., проф. Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», Київ, Україна. setel@ukr.net

Крояло П.М. Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці, Україна. p.kroialo@chnu.cv.ua

Анотація: В роботі розглянуті актуальні питання створення телекомунікаційних систем з використанням хаотичних сигналів. Основна увага приділена питанням розширення спектру частот та дослідження авто- і взаємкореляційних характеристик псевдовипадкових хаотичних сигналів.

Показано, що псевдовипадковий хаотичний сигнал довжиною 32 має рівень бокових пелюсток взаємкореляційної функції більше 0,2, що не можна вважати прийнятним. По мірі збільшення довжини псевдовипадкової послідовності рівень бокових пелюсток взаємкореляційної функції зменшується.

Ключові слова телекомунікаційна система, хаотична послідовність, розширення спектру, широкосмуговий сигнал, кореляційні характеристики.

FEATURES OF CREATION OF TELECOMMUNICATION SYSTEMS USING CHAOTIC SIGNAL

Mykola Kushnir, Ph.D., Ass. Prof. Yu. Fedkovych Chernivtsi National University., Chernivtsi, Ukraine. myk.kushnir@chnu.edu.ua

Sergey Galyuk, Ph.D. Yu. Fedkovych Chernivtsi National University., Chernivtsi, Ukraine. s.haliuk@chnu.edu.ua

Anatoly Semenko, Dr.habil., Prof. Open International University of Human Development «Ukraine», Kyiv, Ukraine. setel@ukr.net

Petro Kroyalo. Chernivtsi National University. Yu. Fedkovych, Chernivtsi, Ukraine. p.kroialo@chnu.cv.ua

Abstract As an aperiodic bounded dynamics in a deterministic system, chaos has been found in various fields of science and technology for the past 50 years. In the last two decades, we have witnessed a rapid development in chaos control (synchronization) theory and its application. As a result, chaos is recognized as a fundamental and useful phenomenon because of its special properties. For instance, ergodicity, aperiodicity, and sensitive dependence on initial conditions are basic concepts from chaotic dynamics utilized in control and synchronization. Among those applications, chaos communication is one of the most challenging fields, due to its promising security, broadband, orthogonality, and the fact that chaotic signals can be generated by low power, low cost, and small size electronic circuits. Moreover, the chaos-based communication scheme promises to integrate source encoding, channel encoding, security, and noise robustness to achieve higher efficiency compared to the conventional ones.

Chaotic signals are characterized by an aperiodic and limited behavior, which is generated by deterministic dynamical systems presenting sensitive dependence on initial conditions. Applications involving chaotic signals have been investigated in several areas, including signal processing and telecommunications. Due to their properties, chaotic signals usually occupy a wide bandwidth and have an impulse-like autocorrelation function. Furthermore, the crosscorrelation between signals generated from different initial conditions tends to be small. These features support the use of chaotic signals in spread spectrum techniques.

The topical issues of creation of telecommunication systems with the use of chaotic signals are considered in the work. The main attention is paid to the expansion of the frequency spectrum and the study of auto- and intercorrelation characteristics of pseudo-random chaotic signals.

It is shown that the pseudo-random chaotic signal of length 32 has a level of lateral petals of the intercorrelation function greater than 0.2, which cannot be considered acceptable. As the length of the pseudo-random sequence increases, the level of the side lobes of the intercorrelation function decreases.

Key words *telecommunication system, chaotic sequence, spread spectrum, broadband signal, correlation characteristics.*

Вступ

За останнє десятиліття попит на послуги в телекомунікаційному секторі був вражаючим. Щоб задовольнити цей попит на зв'язок у реальному часі, послуги, які надаються, мають бути максимально ефективними. Для управління великою кількістю різних користувачів у великому мегаполісі адекватне розподілення смуги частот є життєво важливим і потрібно вирішувати такі проблеми, як взаємні перешкоди.

Альтернативні підходи до стандартної телекомунікаційної системи були запропоновані в літературі [1-2] і можливе рішення з'явилося в так званій хаотичній телекомунікації (chaotic telecommunication, ChT) [3], тобто використанні хаотичних сигналів. В роботі розглядається потенційне використання ChT, що є відносно новою сферою в теорії телекомунікацій, і її основна мотивація походить з того факту, що, з одного боку, хаотичні системи представляють складну структуру, а з іншого, вони керуються деякими дуже нечисленними простими правилами [4]. Крім того, невеликі зміни вхідних параметрів визначають великі відхилення у вихідних. Пряме застосування теорії хаосу до телекомунікаційних систем полягає у звичайному цифровому розширеному спектрі, де інформація розширюється на більш широку смугу частот за допомогою використання хаотичного псевдовипадкового сигналу замість звичайної періодичної псевдовипадкової послідовності, названої послідовністю псевдошуму (pseudo-noise, PN). Остання, в свою чергу, генерується, наприклад, регістрами лінійного зсуву. Проблема з генератором регістрів з лінійним зсувом полягає в тому, що ціна, сплачена за збільшення періоду PN, різко зростає, оскільки необхідний великий обсяг пам'яті та велика кількість логічних схем. Це накладає практичне обмеження на те, наскільки великий період PN насправді може бути створений. Цю проблему можна подолати якраз за допомогою цифрового генератора хаотичної послідовності [5].

Принципи створення широкосмугового сигналу.

Одне з найважливіших застосувань хаотичних послідовностей з'являється в теорії захищеного зв'язку, оскільки ці послідовності мають властивості, необхідні для розширеного спектру (spread spectrum, SS). SS – це техніка модуляції, при якій інформація розширюється по частоті за допомогою послідовності бітів, абсолютно незалежних від інформації. Великою перевагою такого типу модуляції є те, що він дозволяє багатьом різним користувачам спілкуватися в одному діапазоні частот і в один і той же час. В роботі розглядається операція розширення інформаційного спектру за допомогою хаотичних псевдопослідовностей – здійснення прямого розширення спектру (direct sequence spread spectrum, DS-SS).

Найважливішими характеристиками псевдовипадкових послідовностей різного типу є автокореляція та взаємна кореляція. Автокореляція важлива для синхронізації між періодичною псевдовипадковою послідовністю, що генерується в передавачі та в приймачі. Взаємна кореляція псевдовипадкових послідовностей повинна дорівнювати нулю, щоб отримати зв'язок між різними користувачами на тій самій частоті і в той же час. Вкажемо

необхідні властивості хаотичних послідовностей у порівнянні з періодичними псевдопослідовностями шумоподібна форма сигналу ; широкосмуговий спектр.

Переваги 1) чутлива залежність від початкових умов, які бажані для багатокористувацького зв'язку (різні ортогональні послідовності), а також для безпечного зв'язку; 2) практично нескінченно тривалий період без структурних змін генератора, що є також бажаним для багатокористувацького зв'язку і безпечної комунікації; 3) хаотичні генератори можуть бути побудовані однаково як для передавача, так і для приймача, завдяки цифровій реалізації.

Правда є один недолік – синхронізувати отриману послідовність хаосу з локальною, створеною на кінці приймача, є достатньо складним завданням. Реалізація системи SS, що використовує послідовність хаосу без повернення до нуля (non return to zero, NRZ), така ж, як і для системи SS, що використовує класичні послідовності PN.

Принципом системи зв'язку DS-SS є розширення пропускну здатності системи інформаційних сигналів, зазвичай на багато порядків, за допомогою випадкового (або хаотичного) двійкового сигналу. При передачі дані модулюються випадковим (хаотичним) двійковим сигналом для того, щоб розширити пропускну здатність системи сигналу, що передається. У приймачі цей розширений сигнал розповсюджують шляхом використання все тієї ж псевдовипадкової (або хаотичної) двійкової послідовності. На кінцях передавача та приймача повинен знаходитися генератор таких послідовностей і реалізований спосіб їхньої синхронізації на виході приймача.

Рис.1. ілюструє процеси розширення та звуження спектру в основній смузі частот з використанням звичайної псевдовипадкової шумової послідовності (NRZ-ПШ) або з використанням хаотичної псевдовипадкової послідовності (NRZ-хаос).

Модуляційний процес виконано перемноженням $b(t)$ та $c(t)$, звідки отримуємо сигнал розповсюдження $d(t)$

$$d(t) = b(t) * c(t).. \quad (1)$$

Розширений сигнал $d(t)$ надсилається через канал зв'язку, і прийнятий сигнал $r(t)$, показаний у рівнянні (2), має дві складові $d(t - \tau)$, що є переданим розповсюдженим сигналом із затримкою τ через канал передавача і $n(t)$, що є шумом каналу

$$r(t) = d(t - \tau) + n(t). \quad (2)$$

Використовуючи рівняння (2) отриманий сигнал має вигляд

$$r(t) = c(t - \tau) * b(t - \tau) + n(t) . \quad (3)$$

У приймачі ми маємо два види синхронізму, між прийнятим сигналом і сигналом, що генерується в приймачі для виявлення інформації, а саме

- 1) Між передавальною та приймальною розширеними послідовностями, тобто отримання прийнятого $c(t - \tau)$ і генерування на приймачі $c(t - \hat{\tau})$, де затримка $\hat{\tau}$ отримується блоком синхронізації послідовності (див. рис. 1b);
- 2) Між бітами прийнятої інформації $b(t - \tau)$, демодульованих на приймачі. Цей аналіз реалізує блок, який називається бітовим синхронізатором.

Отриманий сигнал $s(t)$ подається на блок детектора, який виконує функцію оцінки інформаційних даних b_k , потім інформація детектується і таким чином можна визначити ефективність передачі даних.

Використання хаотичної NRZ послідовності для DS-SS

Проаналізуємо форми сигналу на передавачі та приймача в часовій та частотній областях для прикладу з наступними параметрами

- Інформація, $b(t)$ біполярний бінарний NRZ код зі значеннями ± 1 В і бітною швидкістю $R_b = 1/T_b = 1$ біт/с;

- Послідовність розповсюдження псевдошуму або хаосу, $c(t)$ біполярний бінарний NRZ код, зі значеннями ± 1 В, і бітною швидкістю $R_c = 1/T_c = 5$ біт/с та результируючим коефіцієнтом підсилення обробки (processing gain) $PG = T_b/T_c = 5$;

- Комунікаційний канал Адитивний білий гаусів шум із двосторонньою спектральною густиною потужності (СГП, power spectrum density) $PSD = N_0/2$ Вт/Гц та автокореляцією $\delta(\tau)$ $N_0/2$;

- Синхронізація (а) розширена послідовність та (b) біт.

Можна визначити коефіцієнт розширення спектру в основній смузі, який зазвичай називають підсиленням обробки PG

$$PG = \frac{\text{Ширина смуги розширеного спектру сигналу}}{\text{Ширина смуги інформації}} = \frac{T_b}{T_c}. \quad (4)$$

PG є важливим параметром продуктивності розширення спектру системи, оскільки більше значення PG передбачає кращі можливості проти перешкод, наприклад у багатокористувацьких стільникових системах та у військових системах, що захищають від перешкод.

В роботі за допомогою MatLab отримані результати для стандартної DS-SS із використанням послідовності NRZ-ПШ та з застосуванням NRZ-хаотичної послідовності у DS-SS.

PG є важливим параметром продуктивності розширення спектру системи, оскільки більше значення PG передбачає кращі можливості проти перешкод, наприклад у багатокористувацьких стільникових системах та у військових системах, що захищають від перешкод.

В роботі за допомогою MatLab отримані результати для стандартної DS-SS із використанням послідовності NRZ-ПШ та з застосуванням NRZ-хаотичної послідовності у DS-SS.

Рис. 2 ілюструє процес прикладу розширення спектру з використанням послідовності NRZ-хаос з періодом $P=5$ та приведеними вище параметрами. На рис.2.а показана інформація про дані $b(t)$, де тривалість кожного біта становить $T_b = 1$ с, а швидкість $R_b = 1/T_b = 1$ біт/с (біти в секунду). На рис. 2.b показана розширююча NRZ-хаос послідовність $c(t)$, де тривалість кожного біта $T_c = 1/P = 1/5 = 0,2$ с, а швидкість $R_c = 1/T_c = 5$ біт/с (біти в секунду). Нарешті на рис. 2.с показаний сигнал розповсюдження $d(t)$, де кожен біт інформації множиться на період послідовності розповсюдження $c(t)$. Таким чином, коли біт інформації дорівнює +1, послідовність розширення становить рівно один період $c(t)$, а коли біт інформації дорівнює -1, розширена послідовність є оберненою до одного періоду $c(t)$, тобто $-c(t)$.

Процес розширення можна продемонструвати і в частотній області. На рис 3а, 3b та 3с показані результати для інформації, $B(f)$, NRZ- хаосу $C(f)$, і для сигналу розширення $D(f)$ відповідно.

Результат процесу розширення смуги частот можна спостерігати, зазначаючи, що інформаційна смуга частот розширюється до смуги частот модульованого сигналу $d(t)$, тобто від $B_b = 1/T_b = 1$ Гц до $B_D = 1/T_c = 5$ Гц.

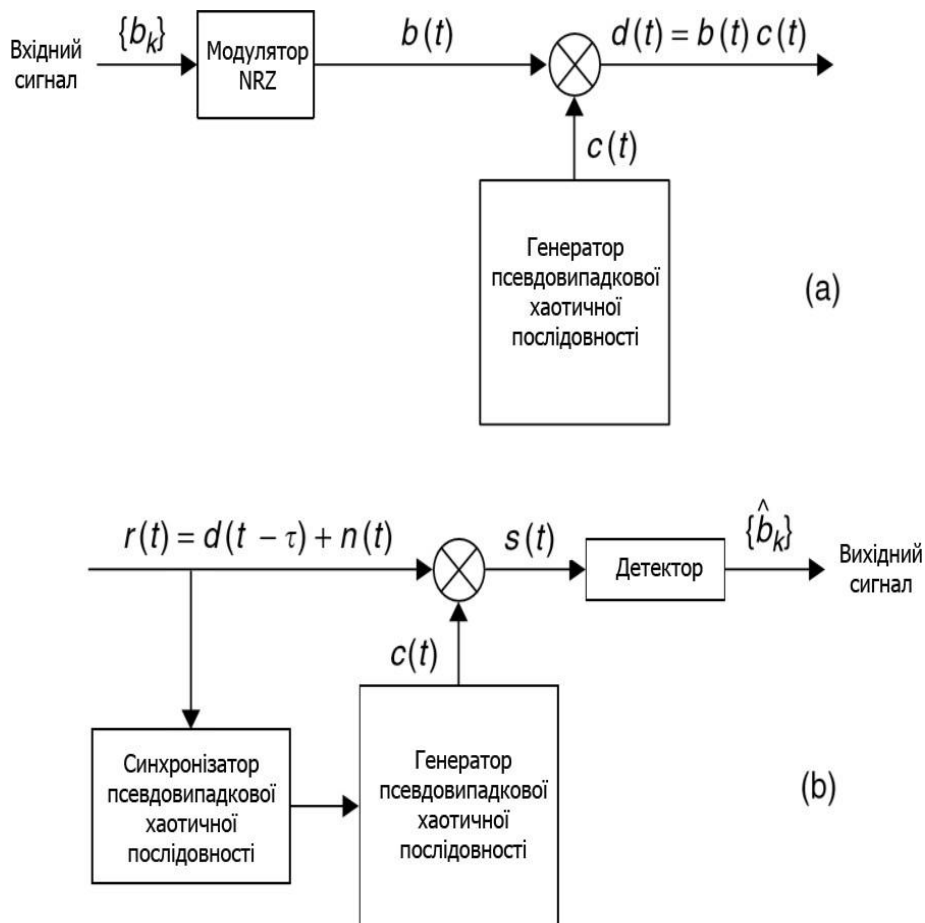


Рис.1. Принцип роботи системи DS-SS : (а) передавач: розширення спектру; (б) приймач: операція звуження спектру; $b(k)$ -вхідний двійковий сигнал; $b(t)$ -інформаційний сигнал; $d(t)$ -псевдовипадковий хаотичний сигнал; $c(t)$ -псевдовипадкова послідовність; $r(t)$ -прийнятий хаотичний псевдовипадковий сигнал; $n(t)$ -шум; $\hat{b}(k)$ -вихідний двійковий сигнал; $c^1(t)$ -опорна хаотична псевдовипадкова послідовність; $s(t)$ -прийнятий інформаційний сигнал

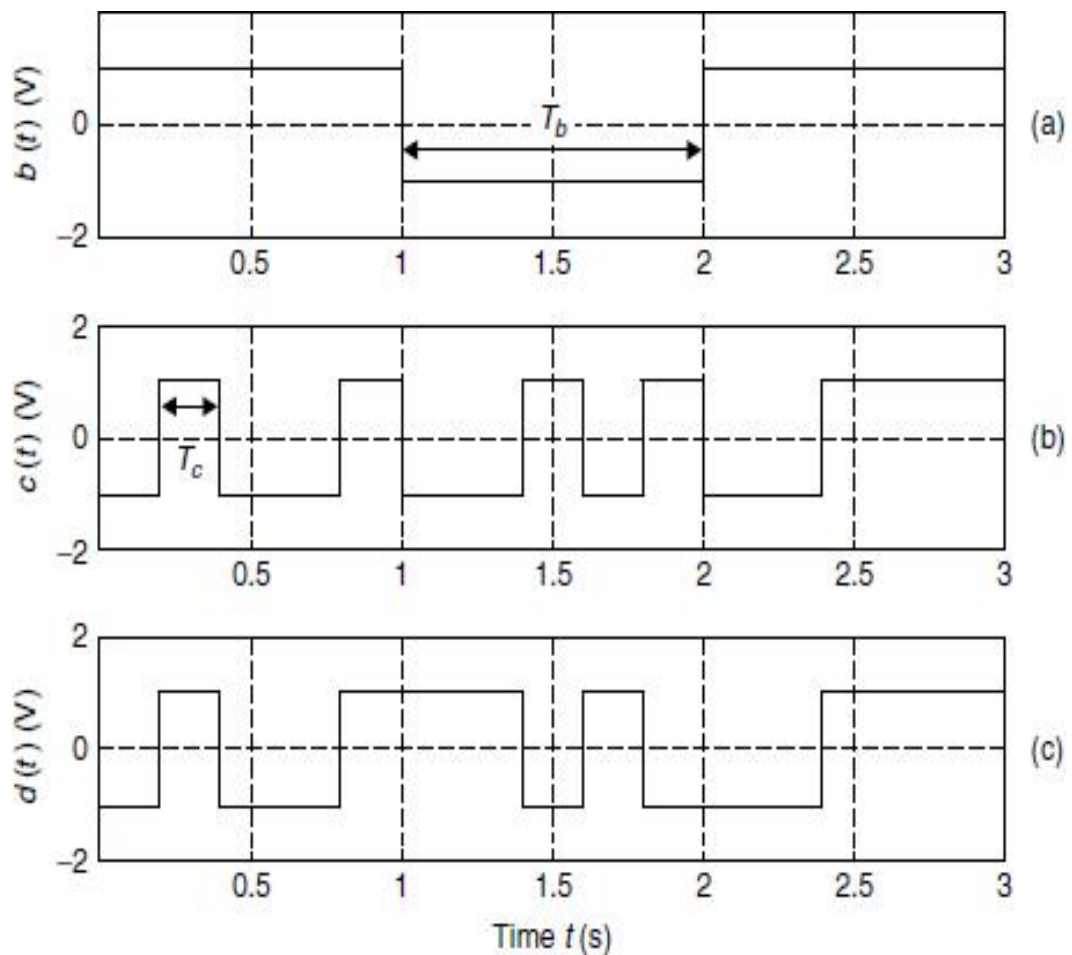


Рис. 2. Принцип роботи системи DS-SS для послідовності NRZ-хаос (а) -дані $b(t)$; (б) - розширення NRZ-хаос $c(t)$; (с)-розширений сигнал $d(t)$

Дослідження кореляційних характеристик хаотичних сигналів

Як було вказано вище, коефіцієнти авто- та взаємкореляції відіграють важливу роль в захищених хаотичних комунікаційних системах. Наведемо деякі результати, отримані для хаотичного сигналу за логістичним відображення, яке відіграє базову роль в системах.

Для отримання результатів (в MatLab) візьмемо наступні початкові умови $x_1 = 0.17$, $x_2 = 0.73$.

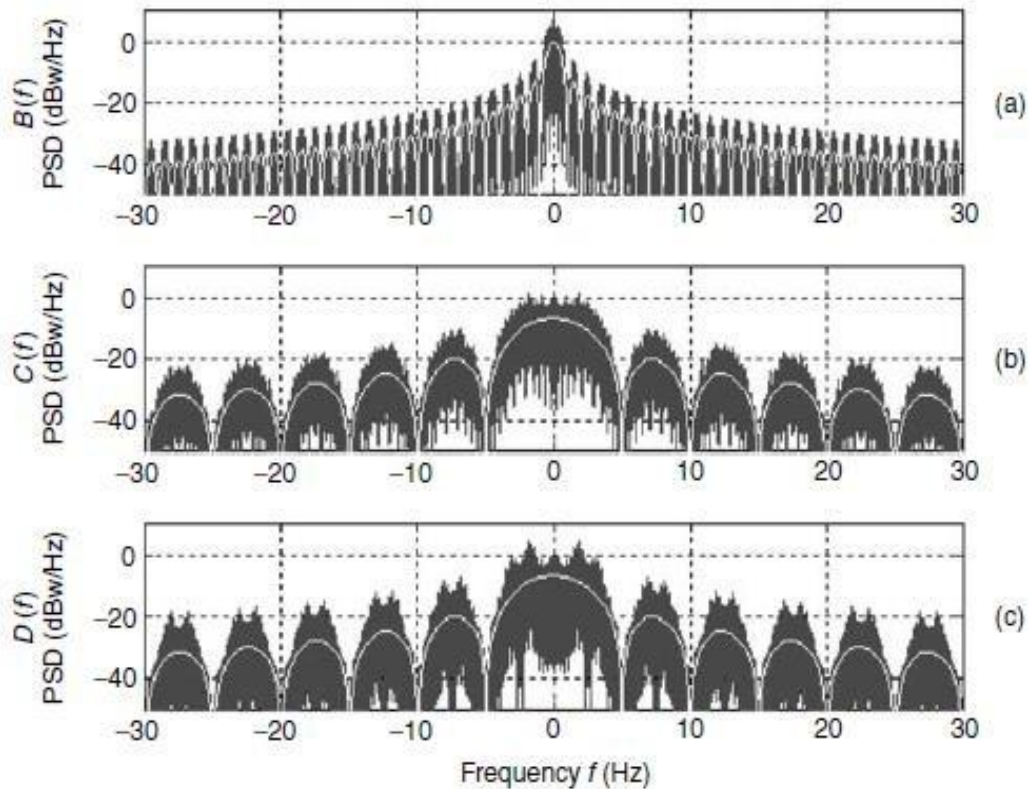


Рис.3. Спектральна густина потужності (PDF) послідовності NRZ-хаос (а) для $b(t)$; (б) для $c(t)$; (с) для $d(t)$

Для заданих початкових умов згенеруємо хаотичні послідовності та проаналізуємо значення отриманих коефіцієнтів авто- та взаємкореляції АКФ та ВКФ відповідно.

АКФ можна знайти як

$$R(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - m)(x(n+k) - m), \quad (5)$$

де

$$D = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - m)^2, \quad (6)$$

$$m = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n). \quad (7)$$

Нормовану ВКФ знайдемо як

$$R(k) = \frac{1}{N\sqrt{D_1 D_2}} \sum_{n=1}^N (x(n) - m_x)(y(n+k) - m_y), \quad (8)$$

де

$$D_1 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - m_x)^2, \quad (9)$$

$$D_2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (y(n) - m_y)^2, \quad (10)$$

$$m_x = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n), \quad (11)$$

$$m = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n) \quad (12)$$

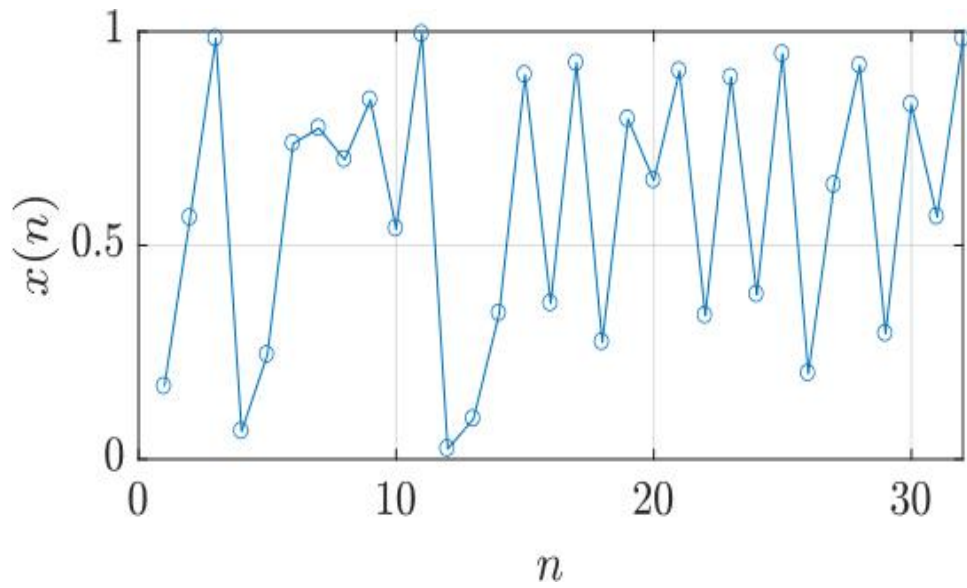
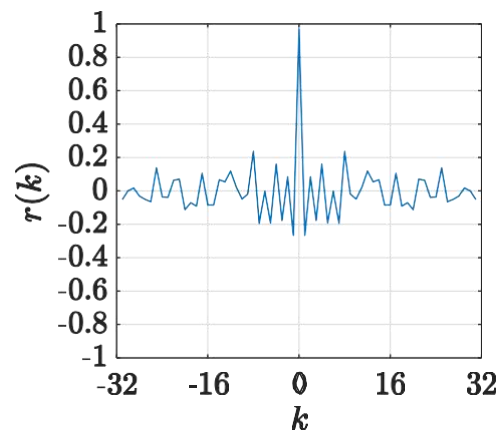
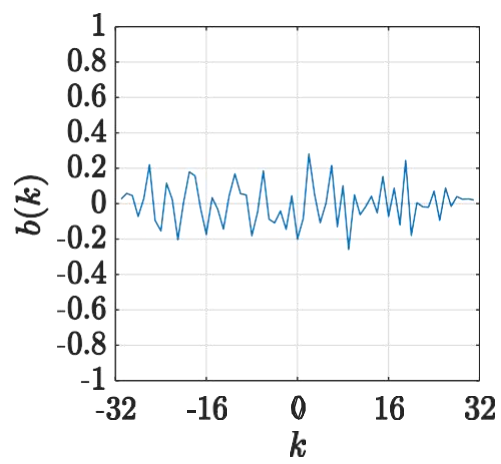


Рис. 4. Приклад перехідного процесу хаотичної послідовності за логістичним відображенням

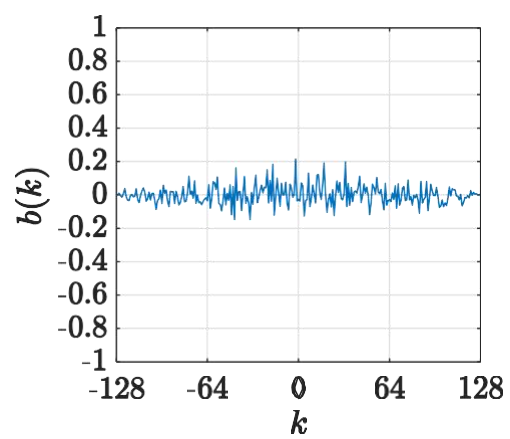
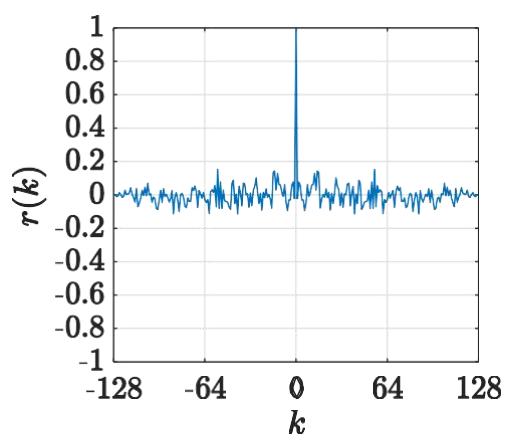
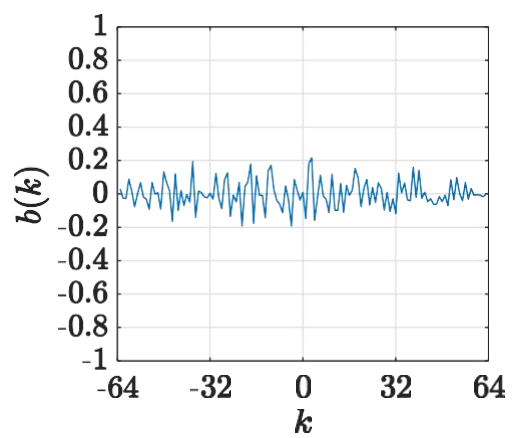
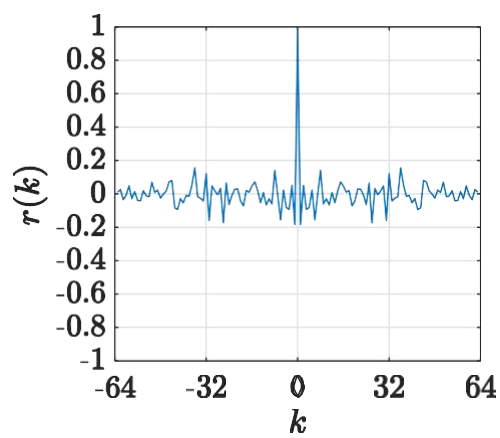
Отримані результати наведені на рис.5. Значення нормованої АКФ та ВКФ перевищує 0,2 тільки для довжини послідовності $k=32$. Зі зростанням довжини послідовності рівень бічних пелюсток АКФ зменшується.

а)

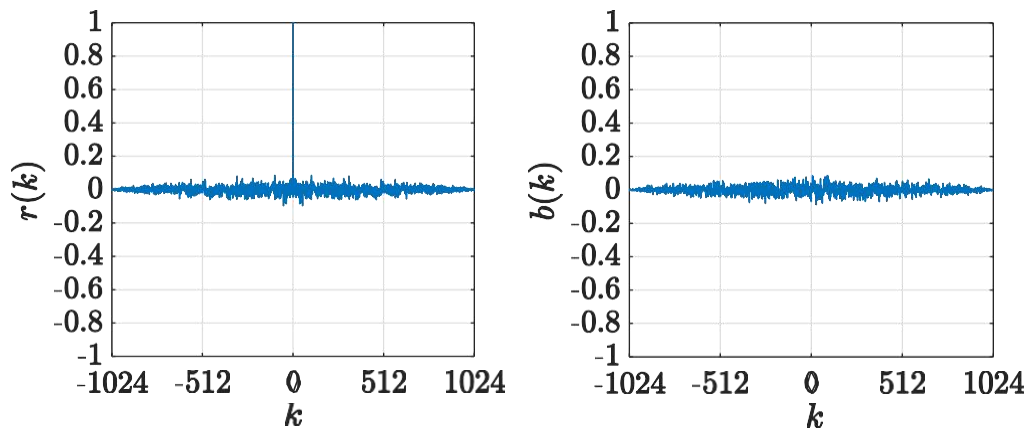




б)



в)



г)

Рис.5. Коефіцієнти автокореляції та взаємкореляції для послідовностей довжиною K а) 32, б) 64, в) 128 та г) 1024.

Висновки

Телекомунікаційні системи з хаотичним широкосмуговим сигналом, сформованим з використанням псевдовипадкових послідовностей на основі хаосу, є новим прогресивним видом зв'язку в умовах дефіциту частотного ресурсу в мегаполісах. Вони можуть здійснювати скритну передачу інформації одночасово декільком абонентам в загальній смузі частот.

Для формування хаотичного широкосмугового сигналу з прийнятним рівнем бічних пелюсток взаємкореляційної функції (не більше 0,2) необхідно використовувати відібрані псевдовипадкові послідовності довжиною більше 32.

Література

1. Abel, A. and Schwarz, W., Chaos communications-principles, schemes, and system analysis, *Proc. IEEE*, 90(5), 691–710, 2012.
2. Kolumbán, G. and Kennedy, M.P., Recent results for chaotic modulation schemes, *ISCAS IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, 3, 141–144, 6–9, May 2011.
3. Kolumbán, G., Vizvári, B., Mögel, A., and Schwarz, W., Chaotic Systems A Challenge for Measurement and Analysis, in *Proc. IEEE-IMTC 1996*, Brussels, pp. 1396–1401, June 2006.
4. Li, B.X. and Haykin, S., A new pseudo-noise generator for spread spectrum communications, *ICASSP-08, Int. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Process.*, 5(9–12), 3603–3606, May 2009.
5. Parlitz, U., *Analysis and Synchronization of Chaotic Systems, Digital Communication Devices based on Nonlinear Dynamics and Chaos*, Third
6. Семенко А.І. Синтез широкосмугової телекомунікаційної системи з підвищеною конфіденційністю передачі інформації шляхом використання псевдовипадкових послідовностей на основі хаосу / Семенко А.І., Кушнір М.Я., Бокла Н.І., Шестопає Є.О. // Вісник університету України. Серія "Інформатика, обчислювальна техніка та кібернетика", Том 1, Випуск 24. – Київ, Україна. – 2020. С. 65 – 74.
7. Кушнір М.Я. Інформаційна безпека хаотичних систем зв'язку / Кушнір М.Я., Семенко А.І., Косован Г.В., Бокла Н.І., Шестопає Є.О. // Вісник університету України. Серія "Інформатика, обчислювальна техніка та кібернетика", Том 1, Випуск 22. – Київ, Україна. – 2019. С. 175 – 181.
- Physical Institute, Georg-August-University Göttingen, WS 2011.
8. Pietgen, H.-O., Jürgens, H., and Saupe, D., *Chaos and Fractals New Frontiers of Science*, Springer-Verlag, NY, 2012.
9. Lam, A.W. and Tantarana, S., *Theory and Applications of Spread-Spectrum Systems*, IEEE/EAB Self-Study Course, NJ, 1994.
10. Itoh, M., Chaos-based spread spectrum communication systems, in *Industrial Electronics, Proc. ISIE 08 IEEE Int. Symp.*, 2, 430–435, 1998.

References

1. Abel, A. and Schwarz, W., Chaos communications-principles, schemes, and system analysis, *Proc. IEEE*, 90(5), 691–710, 2012.
2. Kolumbán, G. and Kennedy, M.P., Recent results for chaotic modulation schemes, *ISCAS IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, 3, 141–144, 6–9, May 2011.
3. Kolumbán, G., Vizvári, B., Mögel, A., and Schwarz, W., Chaotic Systems A Challenge for Measurement and Analysis, in *Proc. IEEE-IMTC 1996*, Brussels, pp. 1396–1401, June 2006.
4. Li, B.X. and Haykin, S., A new pseudo-noise generator for spread spectrum communications, *ICASSP-08, Int. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Process.*, 5(9–12), 3603–3606, May 2009.
5. Parlitz, U., *Analysis and Synchronization of Chaotic Systems, Digital Communication Devices based on Nonlinear Dynamics and Chaos*, Third
6. Semenko A.I. Syntez shyrokosmuhovoi telekomunkatsinoi systemy z pidvyshchenoiu konfidentsiiniestiu peredachi informatsii shliakhom vykorystannia psevdovypadkovykh poslidovnostei na osnovi khaosu / Semenko A.I., Kushnir M.Ia., Bokla N.I., Shestopal Ye.O. // *Visnyk universytetu Ukraina. Serii "Informatyka, obchysliuvalna tekhnika ta kibernetyka"*, Tom 1, Vypusk 24. – Kyiv, Ukraina. – 2020. C. 65 – 74.
7. Kushnir M.Ia. Informatsiina bezpeka khaotychnykh system zviazku / Kushnir M.Ia., Semenko A.I., Kosovan H.V., Bokla N.I., Shestopal Ye.O. // *Visnyk universytetu Ukraina. Serii "Informatyka, obchysliuvalna tekhnika ta kibernetyka"*, Tom 1, Vypusk 22. – Kyiv, Ukraina. – 2019. C. 175 – 181.
- Physical Institute, Georg-August-University Göttingen, WS 2011.
8. Pietgen, H.-O., Jürgens, H., and Saupe, D., *Chaos and Fractals New Frontiers of Science*, Springer-Verlag, NY, 2012.
9. Lam, A.W. and Tantarana, S., *Theory and Applications of Spread-Spectrum Systems*, IEEE/EAB Self-Study Course, NJ, 1994.
10. Itoh, M., Chaos-based spread spectrum communication systems, in *Industrial Electronics, Proc. ISIE 08 IEEE Int. Symp.*, 2, 430–435, 1998.

